

河川感潮域での有機泥輸送における塩分の働き

EFFECTS OF SALINITY ON SUSPENDED MUD TRANSPORT IN TIDAL RIVER

阿部真己¹・今川昌孝²・駒井克昭³・日比野忠史⁴

Masami ABE, Masataka IMAGAWA, Katsuaki KOMAI, Tadashi HIBINO

¹学生会員 広島大学博士課程前期 大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)²学生会員 広島大学博士課程後期 大学院工学研究科 (同上)³正会員 博(工) 広島大学助教 大学院工学研究科 (同上)⁴正会員 博(工) 広島大学准教授 大学院工学研究科 (同上)

From results of observations and laboratory experiments, it is cleared that there is an important effect of salinity on transport processes of organic mud in Delta Rivers. The re-suspended organic matter which is transported from river mouth with tidal intrusion in Tenma River, and the organic matter are settling on the river bank with rising of water level. The settling of the organic matter is accelerated with the salinity is clear, and on the other hands, the resuspension is accelerated with fresh water flowing over the river bed. Organic matters which transported with tidal cycle are separated and are settled depending on the conditions of salinity concentration and organic matter quality bond on the fine soil particles.

Key Words: tidal River, Organic mud, Salinity

1. はじめに

太田川河口に堆積している有機泥には10%以上の有機物が含まれており、有機泥は保水能力が高いために高含水比の状態では浮遊あるいは堆積し、浮泥層を形成している。太田川河口域では出水等の擾乱を受け沈降・巻き上げを繰り返す有機泥は潮汐によって河川上流へと輸送されている。これらの擾乱を受けた有機泥は分解が促進され、保水能力が低下していくことが考えられる。河岸域に堆積している有機泥には分解の進んだ有機物や砂成分が含まれているため、広島湾海底泥に比べて数100%含水比が低い状態で堆積している。さらに生活雑排水の流出もあるために河口域の堆積泥には一次生産起源の有機泥のみではなく、動物性由来の油成分を含んだ有機泥が多く堆積している¹⁾。

太田川デルタを流れる派川(以後デルタ河川)では各々の河床勾配が異なるため、各河道特性に応じた特徴的な海水の遡上機構を有している。天満川へは、図-1に示すように上げ潮初期に濁度が上昇しており(調査地点は河口から6kmと4.5km)、海水の遡上とともに濁質が下流部から輸送されていること、上げ潮初期に遡上する濁質と平均潮位面以上の水位で河岸干潟に堆積する懸濁物質の輸送形態は異なるものであることがわかっている¹⁾。デルタ河川では、潮汐と出水により、淡水と海水の影響

を交互に受けているが、有機物は海水と混合すると微細土粒子(75 μ m以下の土粒子)に有機物が付着し、フロックを形成することが知られている。塩淡水混合は高濁度水塊の挙動の挙動特性に大きく関与しており¹⁾、河口域での有機物の循環の機構や分布特性に重要な役割をもつことが考えられる。

本研究は、デルタ河川での有機泥の循環機構を解明するため、有機泥の輸送過程において河川水と海水が様々

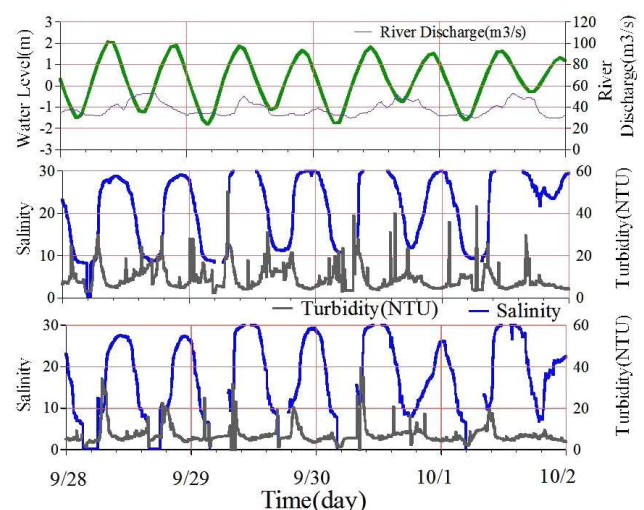


図-1 (a) 水位, 分派前河川流量, 天満川河口から(b)6.0km, (c)4.5kmの経時変化

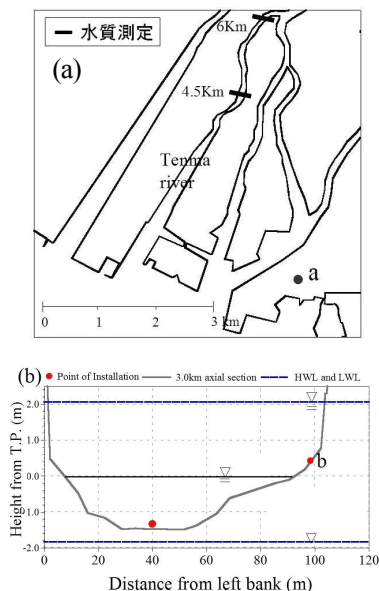


図-2 (a) 天満川調査地点, (b) 天満川4.5km地点における横断面図, セジメントトラップの設置高さ, 採泥位置および測定機器設置位置

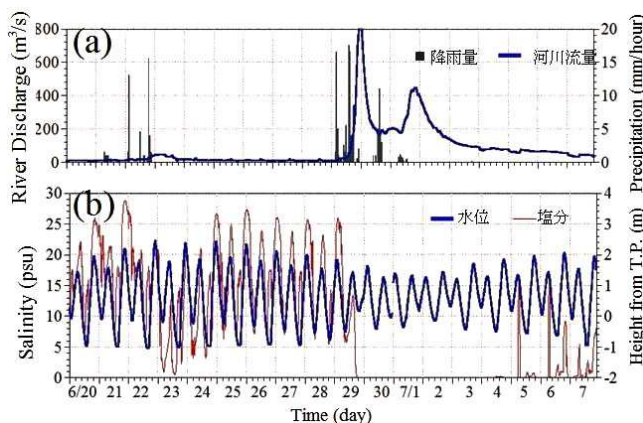


図-3 (a) 2009年6, 7月の河川水量 (矢口第一), 降水量 (広島中区八丁堀), (b) 4.5km地点 (T.P.) で測定された塩分, 水位

な周期で入れ替わる現象が有機泥の堆積・再浮遊に及ぼす効果を明らかにすることを目的とする。このため、デルタ河川での濁度上昇のタイミングと塩分濃度との関係および河川干潟での堆積物の含水状態や塩分含有量に着目した観測を行い、有機泥輸送 (沈降・巻き上がり) に及ぼす塩分の効果を室内実験により検討した。

2. 海水の遡上と淡水の流下

(1) 有機泥の輸送調査の概要

図-2にデルタ内での河道網および調査対象とした天満川4.5km地点における横断面図, 横断面断面内での調査地点が示されている。有機泥の河岸への輸送機構を把握するために、遡上泥および河岸干潟の堆積泥と沈降泥の採取が行われた。沈降泥を捕捉するセジメントトラップ

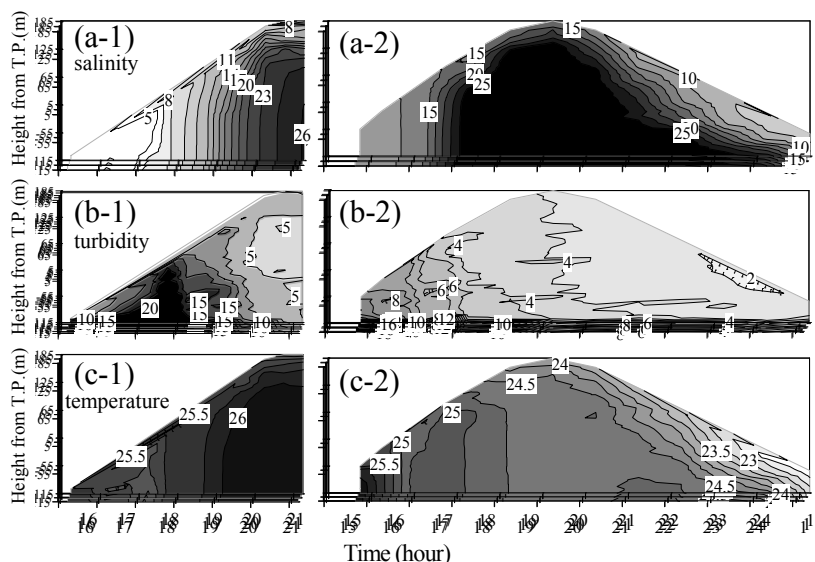


図-4 (a)塩分, (b)水温, (c)濁度の鉛直プロファイル, 左列は2008年度9月17日, 右列2009年度9月17日の観測結果である

($\phi 10 \times 70 \text{ cm}$ の円筒) は、上端開口部が底面上30cmになるように埋設された。2008年9月17日および2009年9月17, 18日の大潮期の上げ潮初期に上流へ輸送される有機泥 (遡上泥) の採取 (図-2(b)), および水質 (塩分・水温・濁度) の連続測定が行われた。水質 (塩分, 水温, 濁度) は多項目水質計, 流速は電磁流速計を用いて約1時間ごとに鉛直分布が測定された (両計測器ともアレック電子)。これと並行して河床から10cm (T.P.+0m) 上に濁度計, CT, TD計が設置され, 定点観測が行われた。図-2(b)に示す河岸干潟でセジメントトラップを14日間設置し沈降泥を採取した。いずれの調査においても有機泥は含水比, 有機物含有量(IL), 粒度分布, POC, およびPONが測定された。POCとPONはCHNS/O分析装置 (パーキンエルマー社製2400 II型), 粒度分布はレーザー回折式粒度分布測定装置 (SHIMADZU社製, SALD 2000-J) を用いて測定された。

(2) デルタ河川に輸送される有機泥の特性

a) 出水による河川の淡水化

図-3には2009年6, 7月の河川水量 (分派点10km上流の矢口第一), 降水量 (図-2, a点), 4.5km地点 (T.P.-1.35m) での塩分, 水位が示されている。6月29日には800m³/s程度 of 出水があるため, 6日後の満潮時においても底層で8psu程度の塩分上昇にとどまっている。出水後7月4日まで5日間程度に渡って塩分はほぼ0psuを維持したが, 7月5日の満潮時に塩分が15psu程度まで上昇している。天満川は他派川に比べて河床が高く, 50m³/sを超える出水があった場合に海水遡上が阻害され, 数日に渡り河床が淡水化する等, 出水によって複雑な塩分変動機構を有している。

b) 海水の遡上にともなう濁質の下流部からの輸送

図-4に潮汐に伴う河川水質 (塩分・濁度・水温) の

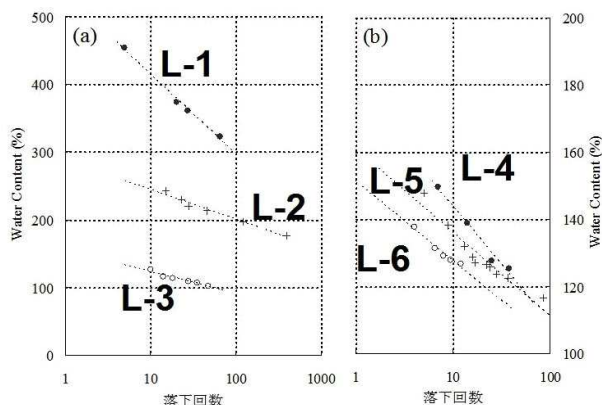


図-5 (a) ベントナイト, (b) 海田湾表層の有機泥を用いた時の液性限界試験の結果

表-1 塩分条件と液性限界値

	試料	添加水の塩分(psu)	液性限界(%)
L-1	ベントナイト	0	367
L-2	ベントナイト	10	227
L-3	ベントナイト	47	111
L-4	有機泥	13	130
L-5	有機泥	16	126
L-6	有機泥	27	118

鉛直分布および経時変動が示されている。2回の水質調査では、調査日の1週間前まで出水量が50m³/sを超えることはなかった。両調査とも上げ潮初期に濁度が上昇し、底層で濁度が大きいことが確認できる。その後さらに海水が遡上し、水位が上昇すると濁度は低下する。

天満川河岸干潟に輸送・堆積される有機泥のD₅₀は20μm程度、C/N比は13程度。河床を遡上する有機泥のD₅₀は40μm程度、C/N比は7程度であり含有される有機物の特性が異なっている²⁾。

感潮河川の河床では、干潮時には河床浮泥層に接する淡水の影響が大きく、上げ潮とともに海水の効果が強くなっていく。上げ潮初期に海水の遡上によって有機泥が輸送されるのは、淡水が濁質の浮遊に影響を及ぼしているためと推定される。また、遡上泥と河岸に沈降する有機泥の性状が異なっていることは、輸送場において塩分濃度と有機物の性状、付着状態の関係で生じる沈降・浮遊によって有機泥が選別されることを示唆している。

3. 有機泥の保水能力に及ぼす塩分の効果

有機泥の物理的特性に含有塩分が影響することは1960年頃から指摘されており、多くの研究成果が得られている³⁾。フロック化した有機泥は塩分濃度の変化に伴って複雑な挙動をすると考えられる。限界掃流力は堆積泥の含水比状態に依存しており⁴⁾、有機泥の輸送過程をモデル化するためには沈降・堆積過程での有機泥の保水特性を把握することが必要である。本章では、有機泥の保水能力に及ぼす塩分の効果を明らかにするために種々の室内実験結果を行った。実験に用いた有機泥の採取場所、

詳しい特性は、今川ら^{2,5)}を参考にされたい(海田湾表層泥はエクマンバージ採泥器により採取されたもの)。

(1) 有機泥の液性限界におよぼす塩分の効果

図-5には有機泥の液性限界値の塩分依存性((a)ベントナイト, (b)海田湾表層の有機泥)が示されている。有機泥の特性を考慮するため無機泥としてベントナイトの特性と比較した。実験に用いた有機泥は遠心分離により脱水を行った後に使用されており、完全には塩分は取り除かれていない。試験は濃度の異なる塩水を試料に添加することにより行われた。表-1に試験条件を示している。

微細土粒子は塩水と混合しやすく、塩分の存在により液状化が促進される³⁾。ベントナイトにその塩分の効果が顕著に現れている(図(a))。ベントナイトでは10%の塩分が添加されることにより液性限界が約140%低下しており、塩分が土粒子の流動性を増大させている。塩分の添加に伴う流動性の増加は有機泥にもみられており(図(b))、ベントナイト、有機泥とも、塩分を多く含むことにより流動性が増すことがわかる。

流動性は粒子間の吸着力と密接な関係があることから、ベントナイト、有機泥ともに塩分を多く含むことで流動し易くなったことは、より少ない水分で流動性を増すことを示しており、塩分の効果により粒子間付着力の水分依存性が減少(分散)したためであると考えられる。有機泥に対する塩分効果はベントナイトに比較して小さいが、これは有機物同士の付着が土粒子同士の吸着と結合形態が異なることが原因として考えられる。塩分により土粒子同士の直接的な吸着が促進されるが、有機物にも土粒子同士の吸着させる効果があることで吸着の水分依存性が低下した結果であると考えられる。粘土鉱物と有機泥の界面は化学的に性質が異なるため、有機泥の流動性・付着は、塩分による効果と有機物による効果を分けて検討することが必要である。

(2) 底泥の沈降速度・堆積含水比に及ぼす塩分の効果

a) 淡水・塩水中での沈降特性

図-6(a)に淡水・塩水条件下での濁質の沈降速度を示した。実験はΦ20cm、高さ70cmのカラム内に満たした淡水・塩水と乾燥重量100gの有機泥を均一に混合した後、水面から深さ10cmに濁度計を貫入して濁度の経時変動を測定した。有機泥として海田湾表層泥を用いた。

淡水中では実験開始後120時間においても濁度が70FTUあり、有機泥の沈降は塩水中で早く、淡水中では微細粒子は沈降しない粒子があることがわかる。

淡水に混合し輸送される微細粒子は淡水中では沈降し難いため、海水が遡上してくるまで沈降は起こらないと考えられる。上げ潮初期の低塩分水塊に混入した有機泥(細粒分)は河川水の塩分濃度が上昇するまで海水の遡上に伴って上流域に輸送され、河岸干潟に海水が冠水すると沈降し、堆積すること、有機泥は海水中で堆積するために塩分が高いことが推測される。

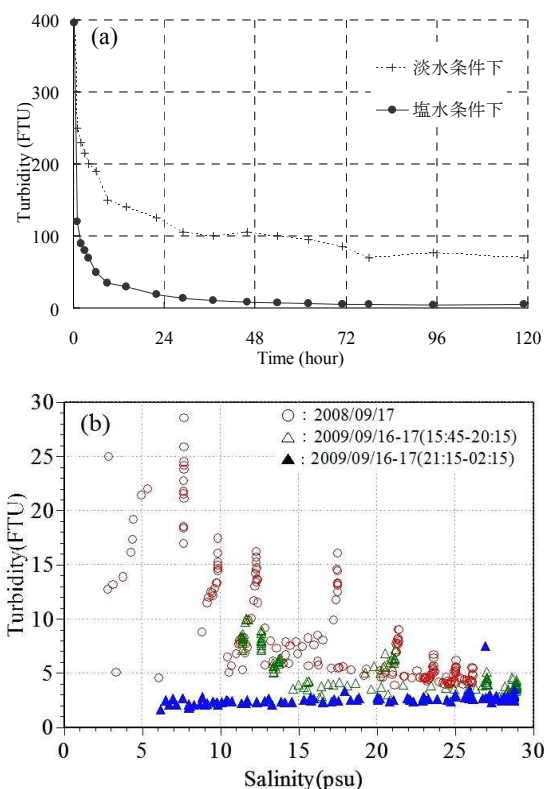


図-6 (a)淡水条件下・塩水(30psu)条件下での濁質の沈降速度の比較, (b)河川水の濁度と塩分の関係

図-6(b)には図4の河床上20cm以浅の水塊の濁度と塩分の関係が示されている。遡上する水塊の濁度と塩分には相関係数0.60程度の関係があり、水塊の塩分濃度が5psu以上になると濁質が沈降していることが考えられ、河川水塩分が5psuを超える水深はT.P.+3m程度であり、有機泥は河岸干潟でも沈降し始めると推定できる。微細粒子は海水との混合により栄養物が付着するとともに沈降し、海水の遡上に伴う濁質の輸送は河岸干潟に栄養物を効率的に分配・蓄積させる役割を持っていることが示唆される。

b) 浸透下での堆積層の膨張・圧縮実験の概要

有機泥の感潮河川水中での堆積および干出時の堆積泥の保水能力に与える塩分の効果の把握のため、図-7に示す実験装置を用いて間隙水の浸透・干出実験を行った。実験では堆積泥水槽と海水供給水槽の2つの水槽に水頭差を付与することで浸透流を起こしている。堆積泥層は上向き流れのある状態の水槽内へ、海水または淡水に一樣に混合した有機泥を流入・沈降させて作成した。また、両水槽から水をサイホンにより抜き取って干出させた。水頭差は堆積泥側の水位を基準として浸透時（上向き流れ）には+1cm、干出時には-6cmを保った。実験では海田湾表層泥を37g/lの濃度に調節して流入させた。また、擬似海水として30psuの塩水を用いている。堆積厚さの変動から膨張量を経時的に測定した。実験開始後48時間は水中での浸透とし、48時間後から9時間の干出、その後3時間の再冠水、9時間の再干出を行った。堆積泥全体

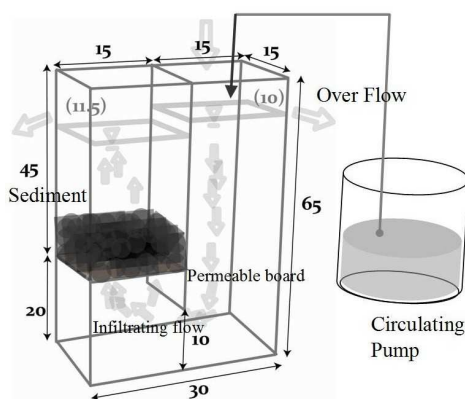


図-7 底泥間隙水の浸透実験装置

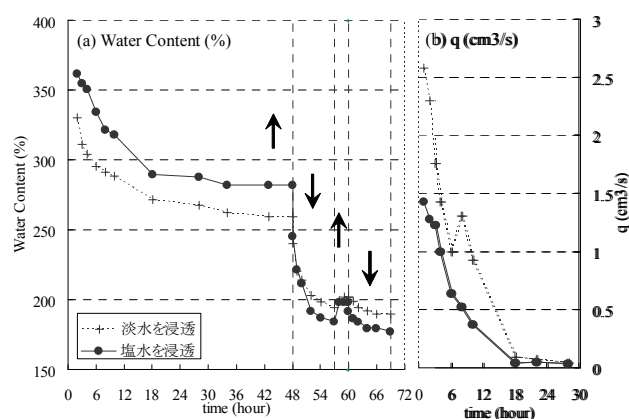


図-8 (a)堆積含水比の経時変動, (b)浸透流量の経時変動

の重量に対する間隙水重量の割合 $\bar{w}$ (%) を含水比として (1)式より含水比が算出された。

$$\bar{w} = \frac{\rho_w (V - \frac{M_s}{\rho_s})}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

ここに M_s は使用泥乾燥重量 (g), V は堆積泥の体積 (cm³), ρ_s は泥粒子密度 (2.5g/cm³), ρ_w は水の密度 (1.01~1.02 g/cm³) である。

c) 堆積状態に及ぼす塩分の効果

図-8には浸透実験による堆積過程での(a)含水比, (b)浸透流量の経時変動が示されている。上向きの浸透がある間は塩水の浸透によって有機泥の含水比は淡水が浸透した時よりも数10%程度増大されるが、干出または下向きの浸透がある間は、塩分の浸透が逆の働き（締め固め）をすることがわかる。

上向きの浸透流量は淡水の場合に塩水の2倍程度大きい。塩水を浸透させた場合では堆積泥全体が膨張を伴って浸透しているのに対し、淡水を浸透させた場合には圧縮量、浸透量とも多くなっている。淡水浸透下での現象は局所的に圧縮が促進され、結合の弱い箇所流れが集中しているために相反する現象（圧縮と浸透）が同時に起こったと考えられる。塩水が浸透する場合には塩分の作用により有機泥が膨張し有機物内を塩水が流れるため

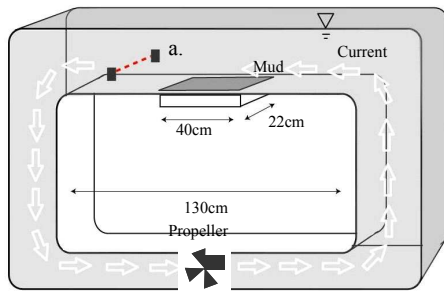


図-9 底泥の巻き上げ実験装置

表-2 底泥巻き上げ実験条件

	使用泥	巻き上げ層作成 方法(間隙内塩分)	流水塩分 (psu)	実験後 含水比	設置後静置 時間(h)
E-1	天満泥	流し入れ (1psu)	0	65	0
E-2	天満泥	流し入れ (1psu)	1	65	0
E-3	天満泥	流し入れ (1psu)	10	65	0
E-4	天満泥	流し入れ (1psu)	30	64	0
E-5	海田泥	沈降(16psu)	0	446	-
E-6	海田泥	沈降(16psu)	1	451	-
E-7	海田泥	沈降(16psu)	10	451	-
E-8	海田泥	沈降(16psu)	30	464	-
E-9	天満泥	流し入れ (1psu)	0	59	24
E-10	天満泥	流し入れ (1psu)	30	71	24
E-11	天満泥	流し入れ (1psu)	0	69	6
E-12	天満泥	流し入れ (1psu)	0	92	72

に、浸透流による圧力を堆積泥全体で分担するため、流水の集中が起こらないと考えられる。実験開始57時間後から上向きの浸透を繰り返し、浸透により堆積泥層を再膨張させたが、元の含水状態を再現できていない。ただし、復元力は塩水下の方が大きい。圧縮した堆積泥の復元力が小さいのは有機物内にあった水が土圧により押し出され圧縮されているため、浸透水では堆積泥を押し上げる力がなく有機物の膨張状態を復元できないためと考えられる。

塩分の高い浸透流場で有機物が沈降する時には高含水比状態が維持され易いこと、堆積泥が干出することにより有機泥が圧縮し保水能力を低減させることが理解される。デルタ河川内での干潮位面以下の常に冠水している有機泥と干潮位面以上の干出の作用を受ける有機泥では、底面せん断力に対する物理的挙動が大きく異なることが考えられる。

(3) 堆積泥の巻き上げに及ぼす塩分の効果

a) 堆積泥の巻き上げ実験の概要

実験は図-9に示す中央部に有機泥の巻き上げ層（幅23cm×流れ方向長さ40cm×厚さ5cm）を設置した回流水槽（幅30cm×長さ130cm×厚さ30cm）を用いて行われた。有機泥の巻き上げ量は図-9のa点（泥表面からの高さ10cm）にレーザーを通し、レーザーの減衰量からSSに換算している。堆積層の含水状態（堆積条件）や流水の塩分濃度が有機泥の巻き上げに及ぼす効果は巻き上った

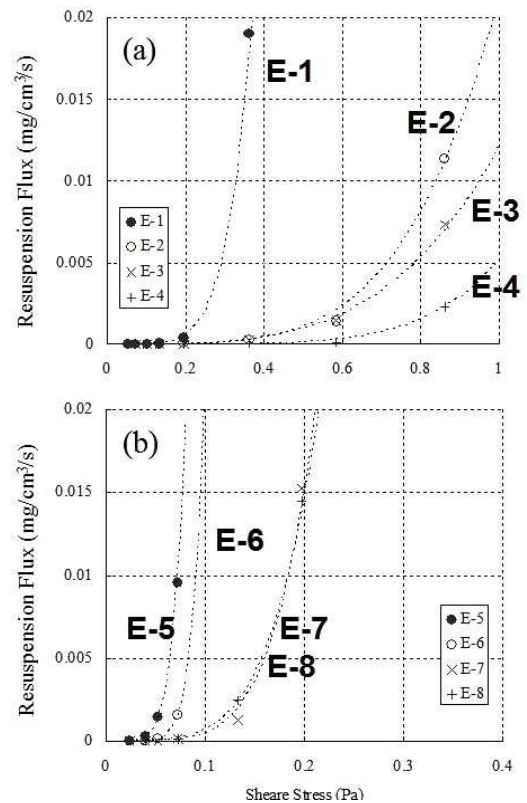


図-10 (a)天満川および(b)海田湾堆積泥を用いた河床のせん断応力に対する巻き上げフラックスの関係

た泥の鉛直Fluxおよび限界せん断応力から評価した。底面せん断応力は電磁流速計で測定した流速の鉛直分布から計算した摩擦速度を用いて算出された。実験では天満川河岸干潟（図-2(b) b地点）で採取された泥（天満泥）と海田湾表層泥（海田泥）を用いて流水の塩分濃度の異なるケースが行われた。有機泥の間隙水内塩分は遠心分離により測定している。表-2には各ケースの実験条件と実験後の巻き上げ層の含水比を示している。堆積状態によって巻き上げ機構は異なるため、本実験では河岸で採取した天満泥と海底で採取した海田泥の使用方法（巻き上げ層作成方法）を工夫することで堆積状態を再現した。天満泥は採取後に一様に混合したものをトレー内に流し入れて、出水（淡水）の作用をうける河岸干潟表層に堆積する有機泥を模擬し巻き上げ層を作成した。含水状態は採取地点そのままの状態であり、一様に混合する以外に調整は行っていない。海田湾海底泥は十分な量の塩水または淡水とともに混合した後、48時間をかけてトレー内に沈降させることで常に河川水中にある河床に堆積する高含水比の有機泥を模擬し巻き上げ層を作成した。

b) 干潟および干潮位面以下に堆積する有機泥の巻き上げに及ぼす塩分の効果

図-10には異なる塩分濃度の流水に対する(a)河岸干潟、(b)LWL以下で堆積した有機泥を模擬した実験での巻き上げフラックスとの関係が比較されている。

干出を受ける有機泥では、流水が淡水の場合のみ極端に大きな巻き上げをみせるが、間隙水塩分よりも多い1psuの塩分が流水に含まれることによって、限界せん断

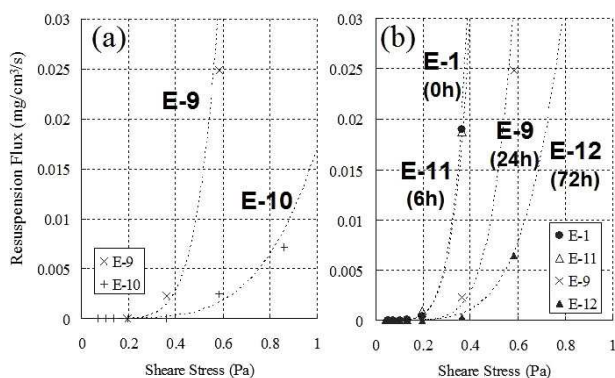


図-11 (a)底泥の淡水化に伴う強度の低下, (b)巻き上げ層作成後の静置時間の経過に伴う巻き上げ層のせん断強度の増加

応力が数倍大きくなっている。流水に塩分が含まれる場合、泥の起伏部で局所的に塊として削られていくのに対し、淡水の場合は、表層全体から細かい土粒子が順に巻き上がっており、流水と間隙水内の塩分の関係によって異なる巻き上げ機構による濁度の上昇が観られた。

LWL以下の常時河川水中で堆積する有機泥では、底泥の含水比が高いため、全てのケースにおいて干出を受ける河岸泥よりも巻き上げ量が增大している。海田泥の間隙水塩分は16psuであり、天満泥よりも間隙水塩分が高い海田泥の場合、流水の塩分が0psu, 1psuの場合には巻き上げ量は、10psuと30psuよりも数倍大きい。海田泥でも天満泥の場合と同じ現象が起きていると考えられ、流水の塩分濃度が堆積泥内間隙水の塩分よりも大きく低下している時に限界せん断応力が低下し、巻き上げ量が增大していることが考えられる。巻き上げ量を決定する要因として堆積泥の含水比、流水の流速に加えて、堆積泥と流水の塩分と塩分差が要因として加えられることが示された。

流水が淡水の時や流水の塩分が1psuの時に大きな巻き上げが発生するのは、流水方向への塩分の拡散により、堆積泥表層の塩分が低下するためと考えられる。間隙水内の塩分が失われることで微細粒子が浮遊し、それに引き続く粗度の増大により、巻き上げが起り易くなっていることが予想される。流水と間隙水の塩分濃度を直接比較することはできないが、流水の塩分が1psuの時に間隙水塩分の低い天満泥で巻き上がらず、間隙水塩分の高い海田泥で大きく巻き上がったことは、巻き上げ現象が流水と間隙水の塩分濃度とのバランスで決定することを示唆している。

c) 有機泥の巻き上げに及ぼす淡水の役割

図-11(a)に天満泥を実験用トレーによく混合した状態で充填し、淡水 (E-9) および塩水 (30psu, E-10) に24時間浸した後に回流水槽を淡水で満たして行った実験での巻き上げ量の比較を示している。流水の塩分濃度は間隙水の塩分濃度に比較的短期間で影響し、淡水条件化での巻き上げ量が指数的に多く (限界掃流力は約1/2) なっている。淡水が数日に渡り河床を覆うことのある天満川では、堆積泥表層への淡水浸透により巻き上げ量が

増大することがわかる。

図-11(b)に巻き上げ層を水槽に静置する時間の違いによる淡水流下での巻き上げ量の比較を示している。粘土は時間経過とともに骨格構造を形成することで強度を増すことが知られているが、本実験の結果も含水比には依存せず時間の経過に伴ったせん断強度の増加が確認された。乱した有機泥を用いた実験では攪乱後の静置時間は実験結果に大きな影響を及ぼすことが示された。

4. おわりに

有機泥の輸送量は、堆積時および巻き上げ時の河川水の塩分に依存することが示され、有機泥の輸送機構に (流速などの外力条件の他に) 塩分が重要な働きを有していることが明らかとなった。以下にその機構を示す。

- (1) 濁質の多くは10psuを越えない水塊により海水の遡上に伴って輸送されている。上げ潮初期の低塩分水塊に混入した有機泥 (細粒分) は河川水の塩分濃度が上昇するまで海水の遡上に伴って上流域に輸送され、河岸干潟に海水が冠水すると沈降・堆積することが推測される。
- (2) 一度圧縮された有機泥は低い含水比を維持し、巻き上げ難い状態にあるが、河床で常に冠水状態にある有機泥は、海水の中で堆積が起こるため高含水比状態が維持され、巻き上げられやすい状態にある。
- (3) 河川水の塩分濃度が間隙水内塩分濃度より低い場合に大きな巻き上げが発生する。塩水に曝される河岸干潟堆積泥は巻き上げ難い。しかし、下げ潮のタイミングで淡水の影響を大きく受ける河床に堆積する有機泥は堆積し難いため、潮汐に伴ってデルタ河川内を循環する。
- (4) 遡上泥と河岸に沈降する有機泥の性状が異なることから、輸送場において塩分濃度と有機物の性状、付着状態の関係によって有機泥が選別されながら分解の進んだ、あるいは油分の多く含む有機泥が徐々に河岸干潟に堆積されていることが示唆された。

参考文献

- 1) 横山勝英, 宇野誠高: 河川感潮域における高濁度水塊の挙動—強混合河川の場合—, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.631-635.
- 2) 今川昌孝, 駒井克昭, 日比野忠史, 阿部徹, 西田芳浩: デルタ河川河口部に堆積する有機泥の分布特性, 水工学論文集, 第53巻, pp.1447-1452.
- 3) 足立泰久, 岩田進午: 土のコロイド現象 (土・水環境の物理化学と工学的基礎), pp.246-249.
- 4) 金キョンヘ, 阿部真己, 駒井克昭, 日比野忠史: 底泥の巻き上げりに及ぼす浸透流の影響, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.1036-1040.
- 5) 今川昌孝, 日比野忠史, 首藤啓, 西田芳浩: 海田湾に堆積する有機泥性状と水質の変動特性, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.971-975.

(2009.09.30受付)